

УДК 656.61.052

DOI: 10.18372/0370-2197.3(108).20443

А. В. БУКЕТОВ, В. Ю. СТРЕЛЬЧЕНКО

Херсонська державна морська академія, Херсон

ВПЛИВ МІКРОДОБАВОК НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ ДЛЯ ЗАСОБІВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ

У роботі досліджено вплив мікродисперсної титано-алюмінієвої шихти, синтезованої високовольтним електроіскровим методом, на адгезійні та механічні властивості епоксидних композитів. Встановлено оптимальні концентрації наповнювача, що забезпечують значне покращення експлуатаційних характеристик матеріалів.

Встановлено, що введення 0,04 мас.% мікродисперсної шихти забезпечує максимальне покращення властивостей композиту: адгезійна міцність при відриві зростає на 53%, адгезійна міцність при зсуві підвищується на 27%, рівень залишкових напружень збільшується на 33%. Такі показники свідчать про формування міцних міжфазних зв'язків між наповнювачем і матрицею, що суттєво підвищує міцність зчеплення композиту з металевою основою.

Також виявлено покращення механічних характеристик епоксикомпозиту при введенні наповнювача за вмісту 0,2...0,5 мас.%. Виявлено зростання руйнівних напружень на 40...56%, підвищення ударної в'язкості на 33...40% і стабільність модуля пружності (без суттєвих змін). Це свідчить про те, що даний діапазон концентрацій дозволяє досягти оптимального співвідношення міцності, ударної стійкості та пружних характеристик отриманих матеріалів.

Отримані результати підтверджують ефективність використання мікродисперсної шихти для модифікації епоксидних композитів. Встановлено, що точне дозування наповнювача дозволяє керувати властивостями матеріалу, забезпечуючи високі експлуатаційні показники.

Отримані результати мають важливе значення для промислового застосування модифікованих епоксидних композитів. Особливу увагу варто звернути на наступні аспекти. Процес введення мікродисперсної шихти не вимагає складного обладнання, а метод формування дозволяє точно контролювати концентрацію наповнювача. З економічної точки зору слід констатувати, що використання оптимальних концентрацій (0,04...0,5 мас.%) мінімізує витрати на наповнювач, а це передбачає зниження витрат на експлуатацію та обслуговування засобів транспорту.

Ключові слова: епоксидні композити, наповнювач, адгезійна міцність, механічні властивості, ударна в'язкість, транспорт, полімер.

Вступ. Сучасні наукові центри провідних країн активно працюють над актуальною науково-технічною задачею – створенням полімерних покриттів для захисту проти корозії і зносу [1, 2]. Ці матеріали мають велике значення для захисту морських і річкових суден, військової техніки, машинобудування, а також об'єктів хімічної, нафтогазової та нафтопереробної галузей. Для покращення експлуатаційних властивостей полімерних (зокрема, епоксидних) композитів та покриттів використовують попередню обробку компонентів матриці та введення порошкоподібних дисперсних добавок [3-7]. Дослідження [8] показали, що магнітне поле суттєво впливає на характеристики композитів, розкриваючи механізм цього впливу. Крім того, вивчено дію ультрафіолетових променів на формування структури матеріалів, що дозволило покращити їх

експлуатаційні якості, особливо у випадку використання наповнювачів з різними фізичними властивостями [9]. Експериментально підтверджено, що комбіноване ультразвукове оброблення епоксикомпозицій у повітряному середовищі та волокон у воді дозволяє отримувати захисні покриття з підвищеною стійкістю до корозії та зношування [8]. На основі цих випробувань були розроблені різноманітні технології оброблення та формування епоксидних композитів з мікродисперсними добавками, а також створено нові вискоєфективні матеріали для захисних покриттів. Водночас завдяки введенню дисперсних мікродобавок у епоксидну матрицю та оптимізації умов полімеризації досягається синергетика у покращенні властивостей композитів. Це суттєво покращує експлуатаційні властивості покриттів, особливо при використанні обладнання в екстремальних умовах експлуатації сучасних суден.

Постановка проблеми та аналіз останніх публікацій. Дослідження, проведені авторами [10], призвели до створення нових епоксидних композитних покриттів, які підвищують довговічність та ефективність роботи морського транспорту. Особливу цікавість представляє те, що при їх виробництві застосовуються мікродисперсні наповнювачі, отримані з промислових відходів.

Такий підхід має низку переваг:

- покращує експлуатаційні якості покриттів;
- знижує собівартість продукції;
- сприяє переробці промислових відходів.

Це вигідно як з економічної точки зору, так і з позиції екології, що робить технологію перспективною для впровадження у транспортній галузі.

Запропоновані матеріали мають суттєві переваги порівняно з вітчизняними та зарубіжними аналогами за рахунок:

1. Цілеспрямованого врахування факторів агресивних експлуатаційних середовищ.

2. Оптимізованого комплексу властивостей:

- фізико-механічних характеристик;
- теплофізичних параметрів;
- корозійної стійкості;
- підвищеної зносостійкості.

Незважаючи на досягнуті результати, залишаються невирішеними ключові проблеми:

- комплексне покращення механічних властивостей та зносостійкості композитних матеріалів (КМ);

- необхідність фундаментальних досліджень у галузі полімерного матеріалознавства, зокрема:

- вивчення механізмів взаємодії компонентів при структуроутворенні (на мікро- і макрорівнях;

- встановлення зв'язку між процесами формування структури та когезійними властивостями матеріалів.

Ці дослідження мають вирішальне значення для подальшого підвищення експлуатаційних характеристик матеріалів, особливо їх зносостійкості.

У зв'язку з цим перспективним напрямом є використання мікродисперсних наповнювачів, здатних до активної взаємодії з епоксидною матрицею, зокрема отриманих методом високовольтного електроіскрового синтезу. Особливу увагу варто приділити дослідженню оптимальної кількості мікродисперсної титанової алюмінієвої шихти (МШ), синтезованої цим методом, у складі епоксидних покриттів для захисту деталей технологічного обладнання.

Мета роботи – дослідити вплив мікродисперсної шихти на механічні властивості полімерних композитів та встановити її оптимальний вміст при формуванні захисних покриттів для засобів водного транспорту.

Матеріали і методика досліджень. В якості базового компонента зв'язуючої системи був застосований епоксидіанова смола ЕД-20, що відповідає вимогам ГОСТ 10587-84. Затверджування епоксидних композицій здійснювали з використанням поліетиленполіамінового твердника (ТУ 6-05-241-202-78), що забезпечує можливість зшивання матеріалів в умовах навколишнього середовища.

Для експериментальних досліджень був залучений мікродисперсний наповнювач – порошкова титано-алюмінієва шихта, синтезована методом високовольтного електророзрядного синтезу. Процес синтезу реалізовувався на дослідному устаткуванні, технічні характеристики якого описані в наукових публікаціях [11-12]. Вихідними матеріалами для синтезу слугувала порошкова суміш наступного складу: Al (15 мас.%) + Ti (85 мас.%).

Експериментальні результати демонструють, що такий синтез призвів до:

1. Суцільного подрібнення всіх частинок наповнювача;
2. Зміни фазового складу з утворенням таких сполук: Ti (75 мас.%) + Al₃Ti (15 мас.%) + Ti₃AlC₂ (10 мас.%);
3. Формування частинок з розмірним діапазоном 10-12 мкм.

У рамках дослідження було проведено комплексну оцінку механічних характеристик матеріалів з використанням стандартизованих методів:

1. Адгезійна міцність. Визначення міцності зчеплення з металевою основою проводили методом рівномірного відриву (ГОСТ 14760-69). Випробування реалізовано на розривній машині УМ-5 (швидкість навантаження 12 Н/с). Додатково досліджено адгезію при зсуві.

2. Залишкові напруження. Визначення здійснювали консольним методом через вимірювання прогину сталеві підкладки під час тверднення покриття [8, 9].

3. Ударна в'язкість. Оцінку проводили на копрі МК-30 відповідно до вимог ГОСТ 4765-73.

4. Деформаційно-міцнісні характеристики. Визначення руйнівних напружень (ГОСТ 4648-71) і вимірювання модуля пружності (ГОСТ 9550-81).

Обговорення результатів експерименту. Попередні дослідження були спрямовані на вивчення адгезійної міцності епоксидних композитних матеріалів. Експериментальні дані (рис. 1) свідчать, що адгезійна міцність при відриві епоксиматриці на рівні 24,9 МПа. Встановлено, що введення мікродисперсної

шихти (МШ) у кількості до 0,04 мас.% істотно покращує адгезійні характеристики матеріалу. Зокрема, спостерігається зростання адгезійної міцності до 38,1 МПа. Такий ефект обумовлений, перш за все, здатністю частинок синтезованої Ti-Al шихти до активізації процесів взаємодії під час формування структури матеріалу. Проведений аналіз дозволяє припустити, що активні центри дисперсної фази (AlTi та TiAlC) взаємодіють з функціональними групами та молекулярними сегментами епоксидного олігомеру. Ця взаємодія прискорює фізико-хімічні процеси на міжфазному кордоні, що сприяє:

- збільшенню ступеню гель-фракції в матеріалі;
- підвищенню адгезійних властивостей композиту;
- поліпшенню загальних експлуатаційних властивостей.

Отримані результати підтверджують ефективність використання мікродисперсних наповнювачів для модифікації епоксидних композитів.

Дослідження виявили зворотну залежність між концентрацією наповнювача та адгезійною міцністю композиту. Згідно з отриманими даними (рис. 1) при концентрації наповнювача 0,4...0,6 мас.% спостерігається формування композиту з адгезійною міцністю 30 МПа.

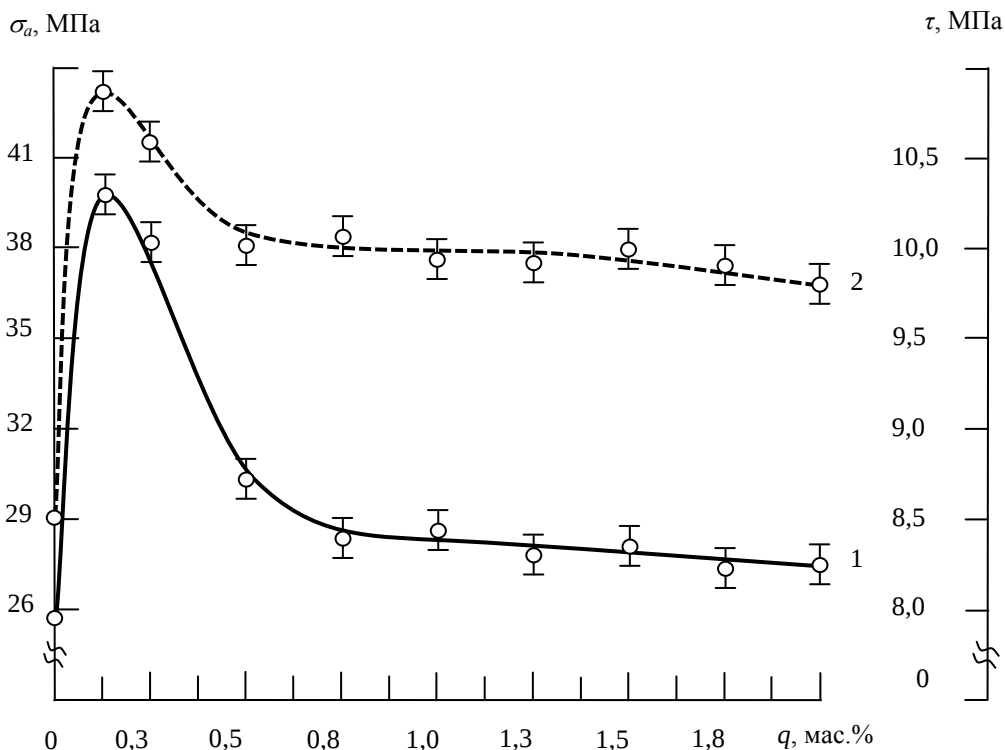


Рис. 1. Вплив концентрації мікродисперсної шихти (МШ) на адгезійні характеристики композитного матеріалу:

- 1 - міцність зчеплення при нормальному відриві (σ_a);
- 2 - міцність зчеплення при дотичному навантаженні (τ).

При подальшому збільшенні вмісту до 1,8-2 мас.% адгезійна міцність знижується до 19,6 МПа. Показники стають нижчими за характеристики чистої полімерної матриці. Таким чином встановлено оптимальний діапазон

концентрації мікронаповнювача у полімерній системі – 0,05 мас.%. Його введення за такого вмісту забезпечує підвищення адгезійної міцності на 53% (від 24,9 до 38,1 МПа).

Отже, встановлено оптимальну концентрацію мікродисперсної шихти (0,05 мас.%) для досягнення максимальних адгезійних властивостей композиту. Підтверджено наявність критичного порогу концентрації наповнювача і доведено ефективність модифікації епоксидного олигомеру при оптимальному вмісті мікронаповнювача. Отримані результати мають важливе значення для розробки епоксидних композитів з покращеними експлуатаційними характеристиками.

Експериментальні дані демонструють чітку кореляцію між адгезійною міцністю при зсуві та відриві (рис. 1), що підтверджує достовірність одержаних результатів. Виявлено наступні закономірності. Оптимальний склад композиту наступний. Максимальні значення адгезії (10,9 МПа) досягаються при вмісті МШ 0,05 мас.%. Це на 2,3 МПа перевищує показники чистої епоксидної матриці. Зростання вмісту МШ понад 0,05 мас.% призводить до поступового зниження адгезійної міцності і сягає значення 9,9 МПа при 1,8-2 мас.%. Оптимальний ефект досягається за рахунок активації взаємодії частинок МШ з епоксидним олигомером. Негативний вплив високих концентрацій обумовлений:

- перенасиченням гетерогенної системи;
- погіршенням змочувальних властивостей;
- зниженням як когезійних, так і адгезійних характеристик гетерогенних композитів.

Отримані результати підтверджують важливість точного дозування мікродисперсної шихти для досягнення оптимальних експлуатаційних властивостей композитних матеріалів. Виявлений механізм концентраційної залежності дозволяє цілеспрямовано керувати властивостями матеріалів.

Дослідження встановили чіткий зв'язок між вмістом мікродисперсного наповнювача та рівнем залишкових напружень (рис. 2). Ключовим результатом є те, що оптимальний вміст добавки у матеріалі (0,04 мас.% наповнювача) зумовлює наявність максимальних значень залишкових напружень (2,0 МПа). Це відповідає піковим значенням адгезійної міцності і їх зростання на 33% порівняно з чистою матрицею (1,5 МПа). Це зумовлено структурними особливостями новоствореної системи. А саме:

- формування щільно-зшитої полімерної структури;
- високою густиною фізичних та хімічних зв'язків;
- максимальним за вибраних технологічних умов ступенем полімеризації.

Таким чином, введення добавки за оптимального вмісту сприяє: активній міжфазній взаємодії, формуванню стабільної тривимірної сітки з максимальною густиною зв'язків. За збільшення вмісту добавки спостерігали негативний ефект перенасичення (>0,04 мас.%). Це зумовлено утворенням структурних дефектів і зниженням густини міжмолекулярних зв'язків. Відповідно, це призводить до порушення гомогенності структури, локалізації напружень і деградації механічних властивостей композитів.

Ці результати підтверджують важливість точного дозування наповнювача для контролю структурних характеристик та експлуатаційних властивостей композитів.

Ключові висновки дослідження на даному етапі.

Встановлено оптимальний вміст мікродисперсної шихти (0,04 мас.%) у композиті. Дана концентрація забезпечує максимальне поліпшення властивостей композиту:

- адгезійна міцність при відриві зростає на 53% (з 24,9 до 38,1 МПа);
- адгезійна міцність при зсуві збільшується на 27% (з 8,6 до 10,9 МПа);
- рівень залишкових напружень підвищується на 33% (з 1,5 до 2,0 МПа).

Отримані на цьому етапі результати демонструють, що введення 0,04 мас.% мікродисперсної шихти дозволяє одночасно: суттєво підвищити адгезійну міцність композиту, зберегти прийнятний рівень залишкових напружень та досягти оптимального балансу між міцнісними характеристиками та структурною стабільністю матеріалу. Ці дані мають важливе значення для розробки високоефективних композитних матеріалів з заданими експлуатаційними властивостями.

σ_z , МПа

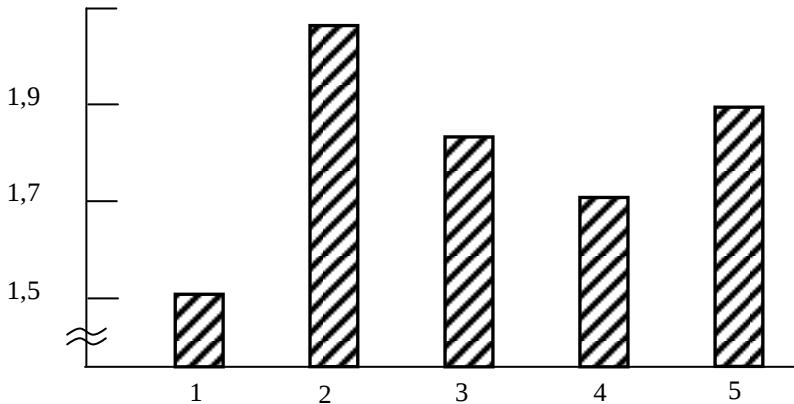


Рис. 2. Вплив концентрації МШ на величину залишкових напружень у покриттях: 1) матриця; 2) 0,05 мас.%; 3) 0,5 мас.%; 4) 1 мас.%; 5) 2 мас.%.

На етапі вивчення механічних характеристик було встановлено (рис. 3), що модуль пружності епоксиматриці – 2,9 ГПа. За низьких концентрацій наповнювача (0,05...0,5 мас.%) не спостерігається суттєвої зміни модуля пружності. За відносно високих концентрацій (>0,8 мас.%) зафіксовано зниження модуля пружності до 2,6 ГПа, що передбачає зниження пружних характеристик на 10,3% порівняно з вихідною матрицею.

Виявлений ефект зниження пружних властивостей при високих концентраціях наповнювача обумовлений перенасиченням композитної системи добавкою, порушенням цілісності полімерної матриці, зменшенням когезійної міцності матеріалу внаслідок утворення дефектів структури.

Таким чином дослідження підтвердили, що оптимальний діапазон концентрації мікродисперсної шихти для збереження пружних властивостей

знаходиться в межах 0,05...0,5 мас.%. Подальше збільшення вмісту наповнювача призводить до погіршення механічних характеристик матеріалу.

Додатково дослідження виявили чітку залежність міцності на згин від концентрації мікродисперсної шихти (МШ). Оптимальний діапазон концентрації МШ: 0,3...0,5 мас.%. У цьому випадку спостерігали максимальне зростання міцності на 40...56% (з 48,1 МПа до 67,4...75,3 МПа). За підвищених концентрацій відмічено суттєве зниження міцнісних характеристик, а показники повертаються до рівня вихідної матриці (48...50 МПа)

Отримані результати демонструють існування чіткого оптимуму концентрації наповнювача, нелінійний характер залежності «концентрація-міцність», що передбачає важливість точного дозування наповнювача для досягнення максимальних експлуатаційних характеристик отриманого композиту.

Водночас для отримання композитів з підвищеною міцністю на згин рекомендовано дотримуватися концентрації наповнювача в діапазоні 0,3...0,5 мас.%, уникати перевищення оптимальної концентрації через ризик різкого зниження міцності, забезпечувати точне дозування компонентів при виготовленні композиту.

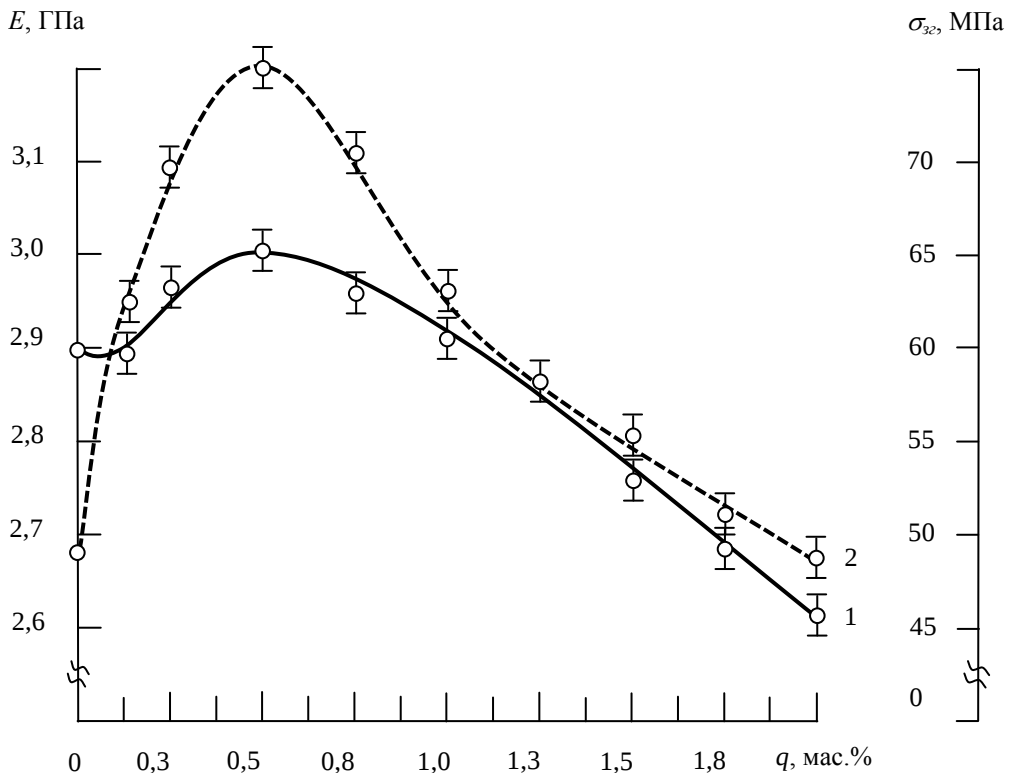


Рис. 3. Вплив концентрації МШ на механічні характеристики композитів:

1 - модуль Юнга при згині (E , ГПа);

2 - границя міцності при згині ($\sigma_{зг}$, МПа)

Експериментальні дані щодо ударної в'язкості (рис. 4) демонструють наступні закономірності. Максимальна ударна в'язкість спостерігається при концентрації МШ 0,2...0,5 мас.%. У такому випадку наповнення показники зростають на 33...40% (з 7,5 до 10...10,5 кДж/м²). Дані результати узгоджуються з тенденціями інших механічних випробувань.

Перевищення оптимального діапазону (понад 0,5 мас.%) призводить до зниження ударної в'язкості і відповідно погіршення механічних характеристик композитів. При цьому використання синтезованого порошку МШ у оптимальному діапазоні концентрацій дозволяє суттєво підвищити опір ударним навантаженням і зберегти інші важливі експлуатаційні властивості матеріалів.

Отримані результати підтверджують ефективність застосування мікродисперсної шихти в оптимальних концентраціях для поліпшення удароміцних характеристик епоксидних композитів. Виявлений діапазон концентрацій (0,2...0,5 мас.%) може бути рекомендований для промислового застосування.

Експериментальні дослідження дозволили визначити оптимальний вміст титано-алюмінієвої мікродисперсної шихти для модифікації епоксидних композитів. Встановлено, що введення наповнювача в діапазоні 0,2...0,5 мас.% забезпечує:

1. Суттєве покращення міцнісних характеристик композитів:
 - руйнівні напруження зростають на 40...56% (з 48 до 67...75 МПа);
 - ударна в'язкість підвищується на 33...40% (з 7,5 до 10...10,5 кДж/м²).
2. Стабільність пружних властивостей матеріалів:
 - модуль пружності залишається на рівні вихідної матриці;
 - відсутність негативного впливу на деформаційні характеристики.
3. Технологічні переваги:
 - збереження стабільності механічних властивостей композитів;
 - можливість контрольованого формування структури матеріалу.

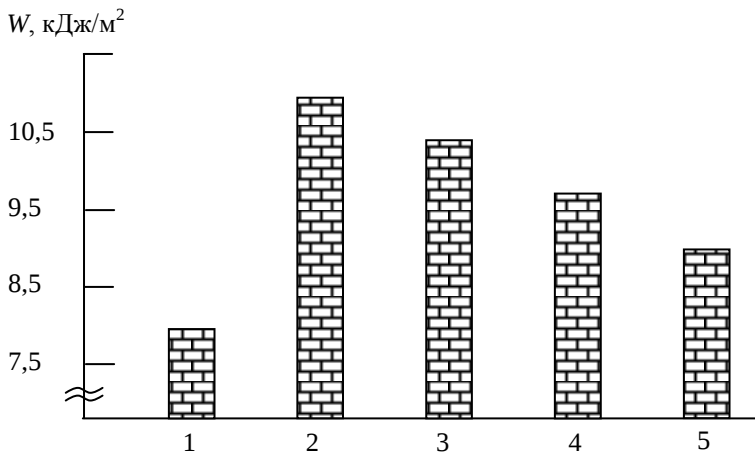


Рис. 4. Вплив концентрації МШ на ударну в'язкість у композитах:

1) матриця; 2) 0,05 мас.%; 3) 0,5 мас.%; 4) 1 мас.%; 5) 2 мас.%.

Отримані результати демонструють можливість цілеспрямованого керування механічними властивостями композитів шляхом точного дозування мікродисперсного наповнювача. Виявлений оптимальний діапазон концентрацій (0,2...0,5 мас.%) дозволяє одночасно досягати підвищення міцності та ударної в'язкості без зміни пружних характеристик матеріалу.

Висновки. У роботі досліджено вплив синтезованої мікродисперсної шихти на адгезійні та механічні властивості епоксикомпозитів для транспортного галузі і доведено наступне:

1. Встановлено оптимальний вміст мікродисперсної шихти (0,04 мас.%) у композиті. Дана концентрація забезпечує максимальне поліпшення властивостей матеріалу:

- адгезійна міцність при відриві зростає на 53% (з 24,9 до 38,1 МПа);
- адгезійна міцність при зсуві збільшується на 27% (з 8,6 до 10,9 МПа);
- рівень залишкових напружень підвищується на 33% (з 1,5 до 2,0 МПа).

Отримані на цьому етапі результати демонструють, що введення 0,04 мас.% мікродисперсної шихти дозволяє одночасно: суттєво підвищити адгезійну міцність композиту, зберегти прийнятний рівень залишкових напружень та досягти оптимального балансу між міцнісними характеристиками та структурною стабільністю матеріалу. Ці дані мають важливе значення для розробки високоефективних композитних матеріалів з заданими експлуатаційними властивостями.

2. При аналізі механічних властивостей матеріалів встановлено, що введення наповнювача в діапазоні 0,2...0,5 мас.% забезпечує:

- а) Суттєве покращення міцнісних характеристик композитів:
 - руйнівні напруження зростають на 40...56% (з 48 до 67...75 МПа);
 - ударна в'язкість підвищується на 33...40% (з 7,5 до 10...10,5 кДж/м²).
- б) Стабільність пружних властивостей матеріалів:
 - модуль пружності залишається на рівні вихідної матриці;
 - відсутність негативного впливу на деформаційні характеристики.
- в) Технологічні переваги:
 - збереження стабільності механічних властивостей композитів;
 - можливість контрольованого формування структури матеріалу.

Отримані результати демонструють можливість цілеспрямованого керування механічними властивостями композитів шляхом точного дозування мікродисперсного наповнювача. Виявлений оптимальний діапазон концентрацій (0,2...0,5 мас.%) дозволяє одночасно досягати підвищення міцності та ударної в'язкості без зміни пружних характеристик матеріалу.

У майбутньому авторами заплановано проведення досліджень щодо визначення оптимальної кількості мікронаповнювача за критеріями зносостійкості.

Список літератури

1. Hyoun, Cho Soo, Scott, R., Paul, V. Braun: Self-healing polymer coatings. *Advanced Materials*. 21 (6), 645-649 (2009).

2. Shaffer, E.O., McGarry, F.J., Hoang, Lan: Designing reliable polymer coatings. *Polymer Engineering & Science*. 36 (18), 2375-2381 (1996).
3. Zhou, C., Lu, X., Xin, Z., Liu, J., Zhang, Y.: Hydrophobic benzoxazine-cured epoxy coatings for corrosion protection. *Prog. Org. Coat.* 76, 1178-1183 (2013).
4. Verma, S., Mohanty, S., Nayak, S.: A review on protective polymeric coatings for marine applications. *Journal of coatings technology and research*. 16, 307-338 (2019).
5. Abass, A.: Olajire Recent advances on organic coating system technologies for corrosion protection of offshore metallic structures. *Journal of Molecular Liquids*. 269, 572-606 (2018).
6. Smith, C., Siewert, T., Mishra, B., Olson, D., Lassiegné, A.: Coatings for Corrosion Protection. *Offshore Oil and Gas Operation Facilities*. 334 (2004).
7. Guan, S.: New challenges and developments in pipeline coatings. *North American Pipelines*. 30-33 (2010).
8. Стухляк, П.Д., Букетов, А.В., Добротвор, І.Г.: Епоксикомпозитні матеріали, модифіковані енергетичними полями. Збруч, Тернопіль (2008).
9. Стухляк, П.Д., Букетов, А.В.: Епоксикомпозитні матеріали, модифіковані ультрафіолетовим опроміненням. Збруч, Тернопіль (2009).
10. Buketov, A., Smetankin, S., Maruschak, P., Yurenin, K., Sapronov, O., Matvyev, V., Menou A.: New black-filled epoxy coatings for repairing surface of equipment of marine ships. *Transport*. 35 (6), 679-690 (2020).
11. Sizonenko, O., Baglyuk, G., Torpakov, A. and other.: Variation in the particle size of Fe-Ti-B₄C powders induced by high-voltage electrical discharge. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 51 (3), 129-136 (2012).
12. Syzonenko, O., Sheregii, E., Prokhorenko, S. and other. Method of preparation of blend for aluminium matrix. *Composites by high voltage electric discharge. Machines. Technologies. Materials*. 11 (4), 171-173 (2017).

Стаття надійшла до редакції 14.06.2025

Букетов Андрій Вікторович – д.т.н., професор, завідувач кафедри транспортних технологій та механічної інженерії Херсонської державної морської академії, проспект Ушакова, 20, м. Херсон, Україна, 73000, E-mail: buketov@tntu.edu.ua, <http://orcid.org/0000-0001-9836-3296>

Стрельченко Владислав Юрійович – аспірант кафедри транспортних технологій та механічної інженерії Херсонської державної морської академії, проспект Ушакова, 20, м. Херсон, Україна, 73000, E-mail: strelchenkovlad94@gmail.com, <http://orcid.org/0009-0001-0774-0832>

A. V. BUKETOV, V. Yu. STRELCHENKO

INFLUENCE OF MICROADDITIVES ON MECHANICAL PROPERTIES OF POLYMER COMPOSITES FOR WATER TRANSPORT VEHICLES

The study investigates the influence of microdispersed titanium-aluminum charge synthesized by high-voltage electrospark method on the adhesive and mechanical properties of epoxy composites. Optimal filler concentrations were determined that ensure significant improvement in the operational characteristics of the materials.

It was established that the introduction of 0.04 wt.% microdispersed charge provides maximum improvement in composite properties: adhesive strength under tension increases by 53%, adhesive strength under shear improves by 27%, and residual stress level rises by 33%. These indicators demonstrate the formation of strong interfacial bonds between the filler and matrix, significantly enhancing the composite's adhesion to metal substrates.

Additionally, improvements in mechanical properties of the epoxy composite were observed when introducing the filler at 0.2...0.5 wt.%. The study revealed a 40...56% increase in ultimate strength, 33...40% improvement in impact toughness, and stable elastic modulus (without significant changes). This indicates that this concentration range allows achieving an optimal balance of strength, impact resistance, and elastic characteristics of the obtained materials.

The obtained results confirm the effectiveness of using microdispersed charge for modifying epoxy composites. Precise dosage of the filler enables control over material properties, ensuring high operational performance.

These findings hold significant importance for industrial applications of modified epoxy composites. Particular attention should be paid to the following aspects. The process of introducing microdispersed charge doesn't require complex equipment, and the forming method allows precise control of filler concentration. From an economic perspective, using optimal concentrations (0.04...0.5 wt.%) minimizes filler costs, suggesting reduced operational and maintenance expenses for transport equipment.

The research proved the high effectiveness of microdispersed titanium-aluminum charge for modifying epoxy composites. The established optimal filler concentrations allow substantial improvement of mechanical and adhesive properties without significant changes to the technological process. The results open new possibilities for creating high-performance composite materials with tailored characteristics.

Keywords: epoxy composites, filler, adhesive strength, mechanical properties, impact toughness, transport, polymer.

References

1. Hyoun, Cho Soo, Scott, R., Paul, V. Braun: Self-healing polymer coatings. *Advanced Materials*. 21 (6), 645-649 (2009).
2. Shaffer, E.O., McGarry, F.J., Hoang, Lan: Designing reliable polymer coatings. *Polymer Engineering & Science*. 36 (18), 2375-2381 (1996).
3. Zhou, C., Lu, X., Xin, Z., Liu, J., Zhang, Y.: Hydrophobic benzoxazine-cured epoxy coatings for corrosion protection. *Prog. Org. Coat.* 76, 1178-1183 (2013).
4. Verma, S., Mohanty, S., Nayak, S.: A review on protective polymeric coatings for marine applications. *Journal of coatings technology and research*. 16, 307-338 (2019).
5. Abass, A.: Olajire Recent advances on organic coating system technologies for corrosion protection of offshore metallic structures. *Journal of Molecular Liquids*. 269, 572-606 (2018).

-
6. Smith, C., Siewert, T., Mishra, B., Olson, D., Lassiegne, A.: Coatings for Corrosion Protection. Offshore Oil and Gas Operation Facilities. 334 (2004).
 7. Guan, S.: New challenges and developments in pipeline coatings. North American Pipelines. 30-33 (2010).
 8. Stukhliak, P.D., Buketov, A.V., Dobrotvor, I.H.: Epoksykompozytni materialy, modyfikovani enerhetychnymy poliamy. Zbruch, Ternopil (2008).
 9. Stukhliak, P.D., Buketov, A.V.: Epoksykompozytni materialy, modyfikovani ultrafioletovym oprominenniam. Zbruch, Ternopil (2009).
 10. Buketov, A., Smetankin, S., Maruschak, P., Yurenin, K., Sapronov, O., Matvyev, V., Menou A.: New black-filled epoxy coatings for repairing surface of equipment of marine ships. Transport. 35 (6), 679-690 (2020).
 11. Sizonenko, O., Baglyuk, G., Torpakov, A. and other.: Variation in the particle size of Fe-Ti-B4C powders induced by high-voltage electrical discharge. Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 51 (3), 129-136 (2012).
 12. Syzonenko, O., Sheregii, E., Prokhorenko, S. and other. Method of preparation of blend for aluminium matrix. Composites by high voltage electric discharge. Machines. Technologies. Materials. 11 (4), 171-173 (2017).

Buketov Andrii Viktorovych – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Transport Technologies and Mechanical Engineering, Kherson State Maritime Academy, 20 Ushakova Avenue, Kherson, Ukraine, 73000, E-mail: buketov@tntu.edu.ua, <http://orcid.org/0000-0001-9836-3296>

Strelchenko Vladyslav Yuriyovych – postgraduate student of the Department of Transport Technologies and Mechanical Engineering, Kherson State Maritime Academy, 20 Ushakova Avenue, Kherson, Ukraine, 73000, E-mail: strelchenkovlad94@gmail.com, <http://orcid.org/0009-0001-0774-0832>